

# Радиооптика

Сетевое научное издание  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Электрон. журн. 2016. № 03. С. 1–17.

DOI: **10.7463/rdopt.0316.0840843**

Представлена в редакцию: 01.04.2016

Исправлена: 15.04.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 504.064.36

## Лазерный мониторинг состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения

Белов М. Л.<sup>1,\*</sup>, Фесенко Ю. С.<sup>1</sup>,

<sup>\*</sup>[belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

Городничев В. А.<sup>1</sup>, Кувшинов А. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В статье рассмотрена задача лазерного дистанционного зондирования с авиационного носителя состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения земной поверхности. Показана возможность дистанционного контроля состояния растительного покрова при лазерном зондировании на двух длинах волн в видимом спектральном диапазоне и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне при высоте полета авиационного носителя порядка единиц километров. Такая лазерная система дистанционного зондирования может работать совместно с флуоресцентным лидаром для увеличения надежности обнаружения стрессовых состояний растительности.

**Ключевые слова:** лазер, дистанционное зондирование, растительный покров, коэффициенты отражения

---

### Введение

В настоящее время лазерные системы используются для решения широкого круга задач локации, связи, видения, дистанционного зондирования и др. [1-3].

Одним из перспективных практических приложений лазерного зондирования является дистанционный контроль состояния растительности. Неблагоприятные внешние факторы, недостаток удобрений и загрязнение окружающей среды приводят к невозможности нормального развития растений. Такие состояния растений (их называют стрессовыми состояниями) на ранних стадиях часто сложно идентифицировать по внешнему виду растительного покрова. Поэтому актуальным является разработка систем мониторинга для обнаружения стрессовых состояний растений.

Эффективным дистанционным методом контроля состояния растительности является метод лазерно-индуцированной флуоресценции [4-6].

Однако, лазерный флуоресцентный метод контроля состояния растений имеет недостаток – из-за небольшого значения сечения флуоресценции для большинства флуорес-

центных лидаров достижимой на сегодняшний день является дальность уверенной регистрации флуоресцентного сигнала 100-150 м.

Поэтому актуальной на сегодняшний день является задача комплексирования флуоресцентного лидара с другой аппаратурой оптического диапазона, позволяющей проводить дистанционный контроль состояния растительного покрова с летательного аппарата при высотах несколько километров (при большой высоте полета сканирующая самолетная аппаратура обеспечивает большую полосу мониторинга на земной поверхности).

Для дистанционного контроля состояния растений наиболее перспективными являются оптические методы спектрального анализа рассеянного назад излучения. Данные методы принципиально позволяют получить оперативную информацию о состоянии растений в реальном масштабе времени и на больших площадях. Эти оптические методы являются на сегодняшний день пассивными - они используют излучение естественного происхождения (прямое или рассеянное излучения Солнца), отраженное растительностью [7-9].

Для оценки характеристик состояния растительности по данным пассивного дистанционного зондирования (с авиационного носителя или с ИСЗ) используются специальные комплексные параметры, называемые индексами вегетации [10-12]. Методы расчета этих параметров базируются на различиях в отражательной способности зеленой биомассы в видимом (VIS) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах спектра. Из-за чувствительности индексов вегетации к таким факторам, как объем зеленой биомассы, отражательная способность почв и атмосферные условия, они широко применяются при анализе состояния земной поверхности. Это позволяет использовать их для задач картирования растительного покрова, мониторинга засушливых районов, контроля влагосодержания почв и фаз вегетации растительности, оценки состояния экосистем и продуктивности сельскохозяйственных культур.

Однако, недостатком пассивных систем дистанционного зондирования в видимом спектральном диапазоне является невозможность работы в темное и сумеречное время суток и сильная зависимость от оптического состояния атмосферы.

Одним из наиболее перспективных вариантов аппаратуры оптического диапазона, позволяющей не зависимо от времени суток контролировать состояние растительности при большой высоте полета носителя, является активная система дистанционного зондирования, проводящая измерение коэффициентов отражения подстилающей поверхности на нескольких длинах волн.

Статья посвящена анализу возможностей активной системы дистанционного контроля состояния растений по данным измерений коэффициентов отражения подстилающей поверхности на нескольких длинах волн. Такая задача представляет практический интерес для мониторинга состояния растительного покрова с авиационного носителя.

## 1. Анализ возможностей активной системы дистанционного контроля состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения подстилающей поверхности на нескольких длинах волн

Спектральные характеристики растений в основном определяются способностью их листы поглощать, пропускать и отражать солнечное излучение и существенно зависят от длины волны излучения.

На развитие и физиологическое состояние растений, а, значит, и на их спектральные характеристики сильное влияние оказывают такие факторы как осадки, колебания температуры, солнечная радиация, климатическая зона, время года, тип почвы, болезни растений, загрязнение почвы и воздуха и т.п. [7].

Реакция растений особенно ощутима в экстремальных ситуациях, например, при резком изменении уровня грунтовых вод, засолении или загрязнении почвы, засухе и т.п.

Наиболее отчетливо характерные особенности отражательной способности растений проявляются при переходе от видимого диапазона спектра к ближнему инфракрасному диапазону. В спектральном ходе коэффициентов отражения растительности в неблагоприятных условиях это будет проявляться в резком падении отражательной способности растений в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне – см. рисунок 1, где показана спектральная отражательная способность здоровых (кривая 1) и поврежденных (кривая 2) листьев [7].

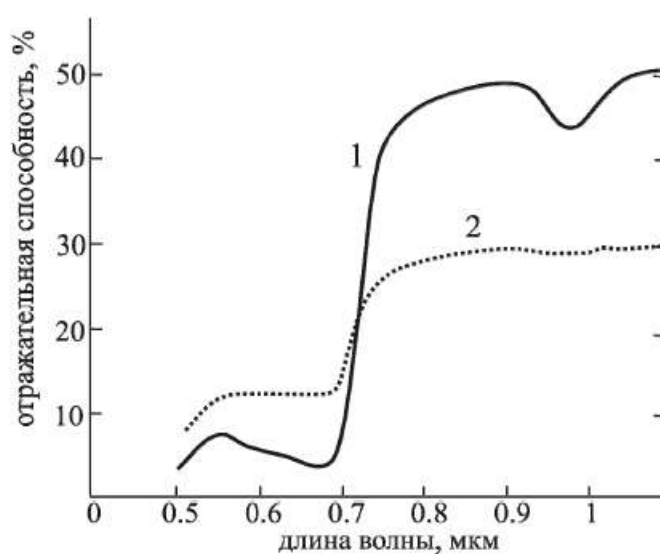


Рис.1 – Спектральная отражательная способность здоровых (1) и поврежденных (2) листьев [7]

В видимой спектральном диапазоне (0,4 – 0,7 мкм) происходит довольно сильное поглощение с максимумом коэффициента отражения в зеленой (0,52-0,58 мкм) области спектра. При этом только небольшая часть излучения отражается от поверхности листа растения, которая практически прозрачна для падающего на нее излучения во всем видимом спектральном диапазоне. Поглощение и отражение излучения происходят внутри

листа в хлоренхиме. Хлорофилл поглощает излучение в синем (0,45-0,48 мкм) и красном (~0,69 мкм) спектральных диапазонах. Таким образом, здоровые листья имеют низкий коэффициент обратного рассеяния в максимумах поглощения хлорофилла, что связано с поглощением излучения этим пигментом.

Излучение в зеленой области спектра хлорофилл в основном отражает. Это объясняет зеленый цвет растительности и максимум спектральной отражательной способности здоровых растений в зеленой спектральной области. Величина локального максимума спектральной отражательной способности здоровых растений вблизи 0,55 мкм связана с концентрацией основных фотосинтезирующих пигментов растения.

Стресс растений приводит к изменению спектральной зависимости их коэффициента отражения. Исчезает локальный максимум в зеленой спектральной области и растительность перестает быть зеленой. Одновременно, увеличивается отражательная способность растений в синей и красной областях спектра (см. рисунок 1). Спектральная зависимость коэффициента отражения растений, находящихся в стрессовых состояниях (из-за неблагоприятных для развития растений условий), в целом имеет более плавный вид (по сравнению со здоровыми растениями). «Скачок» отражательной способности при переходе от красной к ближней инфракрасной спектральной области заметно уменьшается [7].

В ближней инфракрасной спектральной области (более 0,75 мкм) значение коэффициента отражения растений достигает максимальной величины. В этом спектральном диапазоне поверхность листа растения и хлоренхима являются прозрачными. Отражение происходит в другом слое внутри листа - слое мезофилла. Многократные отражения внутри листа приводят к сильному суммарному отражению излучения в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне.

При дальнейшем увеличении длины волны излучения (1,3 – 2,5 мкм) коэффициент отражения растительности опять уменьшается.

Примеры спектров отражения разных видов растительности (как в нормальном состоянии в различные периоды вегетации, так и в стрессовом состоянии, вызванном различными причинами) приведены на рисунках 2-13 [13-18].

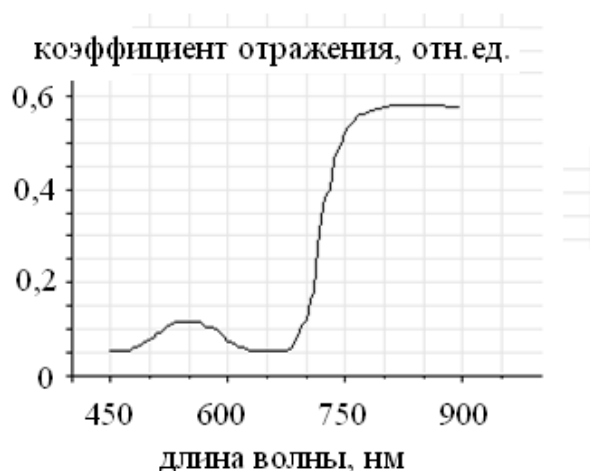
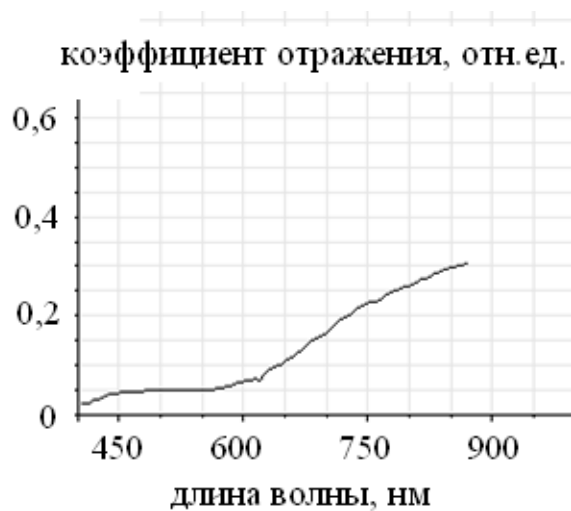
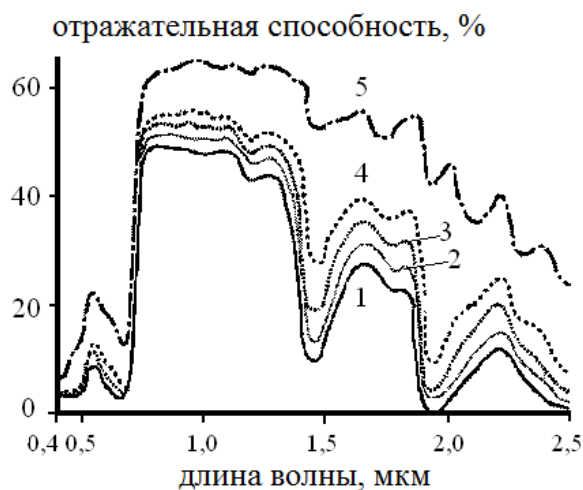


Рис.2 – Спектр отражения здоровых листьев картофеля [13]



**Рис.3** – Спектр отражения листьев картофеля, пораженных фитофторой [13]



**Рис.4** - Спектр отражения листа магнолии (*Magnolia grandiflora*) при уменьшении относительного влагосодержания [14]. 1 – 100%, 2 – 75 %, 3 – 50%, 4 – 25%, 5 – 5%.



**Рис.5** - Спектр отражения листьев кукурузы в нормальных условиях [15]

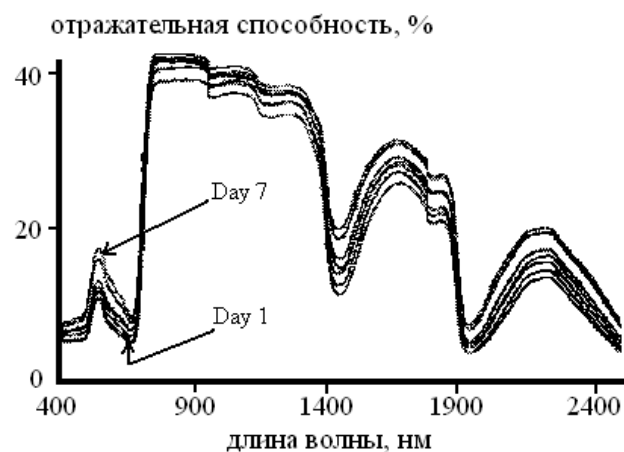


Рис.6 - Спектр отражения листьев кукурузы в отсутствии полива от 1 до 7 дней [15]



Рис.7 - Спектр отражения сосны лучистой в нормальных условиях (1) и при дефиците азота в почве (2) [16].

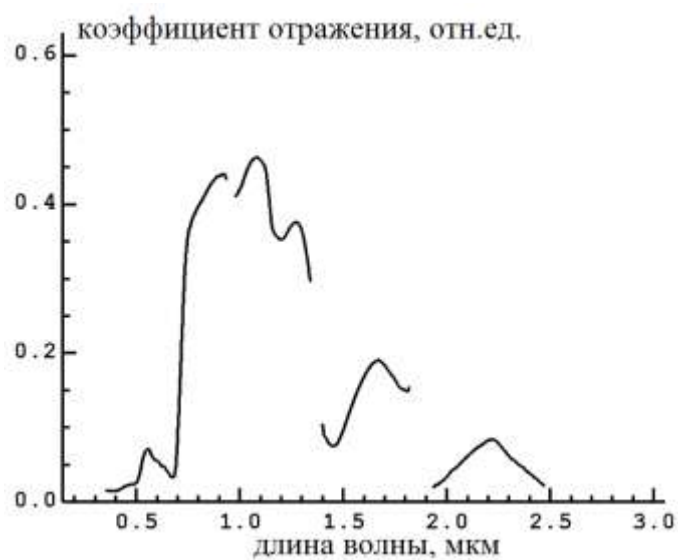
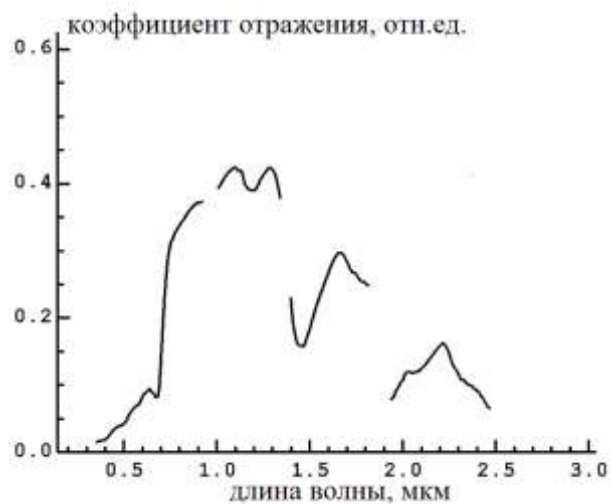
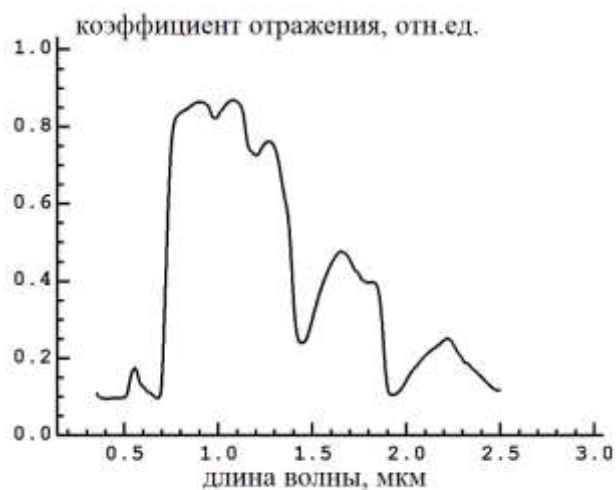


Рис.8 - Спектр отражения листьев молочая (*Euphorbia esula*), июль месяц [17].



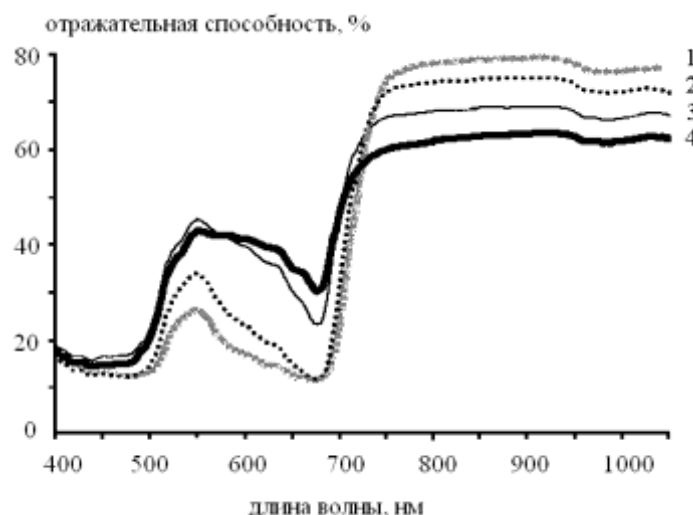
**Рис.9** - Спектр отражения листьев молочая (*Euphorbia esula*), октябрь месяц [17]



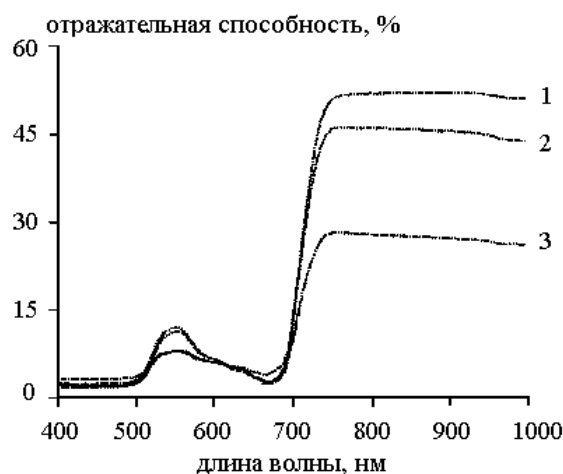
**Рис.10** - Спектр отражения зеленого листа дуба [17]



**Рис.11** - Спектр отражения высушенного листа дуба [17]



**Рис.12** - Спектр отражения листьев фасоли (*Phaseolus vulgaris* Tendergreen) при разных причинах стрессовых состояний .1 – контрольные измерения в нормальных условиях, 2 – измерения через 14 дней после нефтяного (diesel engine oil) загрязнения почвы, 3 – измерения через 14 дней после заболачивания (затопления) почвы, 4 – измерения через 14 дней после как нефтяного загрязнения, так и затопления почвы



**Рис.13** - Спектр отражения березы японской (*Betula papyrifera*) 1, пихты бальзамической (*Abies balsamea*) 2, красной ели (*Picea rubens*) 3 в нормальных условиях [18]

Отметим, что представленные на рисунках 2-13 спектры отражения различных видов растений как в нормальных, так и в неблагоприятных условиях, относятся к различным видам экспериментальных исследований: измерениям спектров растений с помощью переносной аппаратуры в естественных природных условиях; измерениям в определенных условиях спектров растений, выращенных в теплице; измерениям в лабораторных условиях спектров отдельных (за несколько минут до этого отрезанных) листьев растений.

Спектры отражения растительности, приведенные на рисунках 2-13, в целом показывают, что описанные для рисунка 1 спектральные особенности коэффициента отражения зеленых растений в нормальном состоянии проявляются как в отдельном листе, так и



в растительных сообществах (как в теплицах, так и в естественных природных условиях) независимо от их вида растений. При этом, спектральные особенности коэффициента отражения растений в стрессовом состоянии зависят от вида растительности, что требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Особенности спектров отражения растительности, находящейся в неблагоприятных условиях, и здоровой растительности могут быть физической основой работы активной системы дистанционного контроля состояния растений по данным измерений коэффициентов отражения растительного покрова. Такая активная (лазерная) система дистанционного зондирования может проводить контроль состояния растительного покрова используя в самом простом варианте две длины волны излучения – одну в видимом спектральном диапазоне (например, 0,532 мкм – вторую гармонику лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима), а другую – в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне (например, 0,8...0,9 мкм – полупроводниковый лазер на арсениде галлия).

Проведем теперь оценку возможной высоты авиационного носителя для активной системы дистанционного контроля состояния растений по данным измерений коэффициентов отражения растительного покрова.

## **2. Оценка высоты зондирования активной системы мониторинга, проводящей измерение коэффициентов отражения растительного покрова**

Высоту зондирования активной системы мониторинга, проводящей измерение коэффициентов отражения растительного покрова, можно оценить из условия равенства (для предельной высоты зондирования) мощности лазерного сигнала, регистрируемого приемником, и пороговой принимаемой мощности фотодетектора.

Считаем, что в лазерное пятно на земной поверхности с растительным покровом попадает много растений (или много листьев одного большого растения) и используем для растительного покрова модель диффузного отражателя. Для этой модели отражения выражение для мощности принимаемого лазерного сигнала при импульсном зондировании имеет вид [3]

$$P(t) \cong P_c f(t), \quad (1)$$

где

$$P_c = \frac{b_t b_r A T^2}{L^2 (\alpha_t^{-2} + \alpha_r^{-2})}, \quad (2)$$

$f(t)$  - форма импульса лазера;

$\alpha_t, \alpha_r$  - угол расходимости лазерного источника и поле зрения приемной оптической системы;

$b_{t,r}$  - величины, зависящие от параметров лазерного источника и приемника. В прозрачной земной атмосфере величины  $b_{t,r}$  определяются выражениями [3]

$$b_t = \frac{P_o K_t}{\pi \alpha_t^2}, \quad b_r = \pi r_r^2 K_r,$$

$P_o$  – мощность излучения лазера;

$r_r$  – радиус приемной апертуры;

$K_t, K_r$  – коэффициенты пропускания оптической передающей и приемной систем;

$L$  - высота полета носителя;

$T$  - коэффициент пропускания земной атмосферы на трассе зондирования;

$A$  - альбедо земной поверхности;

Для вертикальной трассы в схеме моностатического зондирования имеем

$$T = \exp\left\{-\int_0^L [\varepsilon(x) + k(x)] dx\right\},$$

$\varepsilon(x)$  – вертикальный профиль показателя аэрозольного ослабления атмосферы;

$k(x)$  – вертикальный профиль показателя поглощения атмосферными газами.

В качестве фотодетектора в системах лазерного дистанционного зондирования видимого спектрального диапазона часто выбирается фотоэлектронный умножитель. Пороговая мощность фотоэлектронного умножителя определяется формулой

$$P_{thr} = \frac{\mu [2e(I_t + I_b)(1 + B)\Delta f]^2}{S_k}, \quad (3)$$

$\mu$  - требуемое отношение сигнал/шум;

$e=1.6 \cdot 10^{-19}$  [А·с] – заряд электрона;  $(1+B) \cong 2.5$ ;

$I_t$  – темновой ток фотокатода;

$I_b$  - среднее значение тока, обусловленного фоновым излучением;

$\Delta f$  – полоса частот фотоприемного устройства;

$S_k$  – спектральная чувствительность фотокатода фотоэлектронного умножителя.

При узком поле зрения приемной оптической системы и узкополосном интерференционном фильтре выражение для  $I_b$  имеет вид [3]

$$I_b = K_r L_b S_r (\pi \alpha_r^2) S_k \Delta \lambda, \quad (4)$$

где

$L_b$  - яркость фонового излучения;

$S_r$  - площадь приемной апертуры;

$\Delta\lambda$  - полоса пропускания интерференционного фильтра.

Источником фонового излучения в видимом спектральном диапазоне является излучение Солнца, рассеянное в земной атмосфере. При высокой прозрачности атмосферы в случае зондирования вертикально вниз яркость  $L_b$  равна [3]

$$L_b = S_\lambda \cos \theta_o A(\theta_o) \exp\left[-\frac{\tau_o}{\cos \theta_o} - \tau\right] + 0,25\lambda_s S_\lambda \chi(\gamma) \frac{\cos \theta_o}{1 + \cos \theta_o} \times \\ \times \exp[-(\tau_o - \tau)] \left\{ \exp\left[-(\tau_o - \tau)\left(1 + \frac{1}{\cos \theta_o}\right)\right] - \exp\left[-\tau_o\left(1 + \frac{1}{\cos \theta_o}\right)\right] \right\}, \quad (5)$$

где  $\cos \gamma = -\cos \theta_o$ ;

$\lambda_s$  - вероятность выживания фотона в атмосфере;

$\pi S_\lambda$  - спектральная солнечная постоянная для длины волны зондирования;

$\tau_o, \tau$  - оптическая толща земной атмосферы на длине волны зондирования и оптическая толща земной атмосферы между земной поверхностью и носителем;

$\theta_o$  - зенитный угол Солнца;

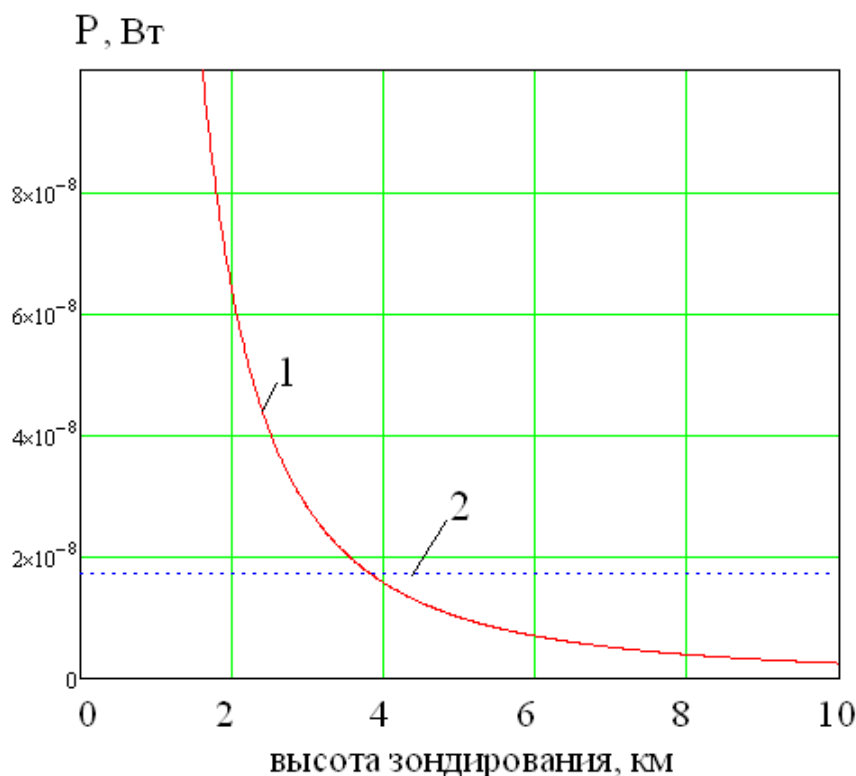
$\chi(\gamma)$  - индикатриса рассеяния земной аэрозольной атмосферы.

Оценку предельной высоты авиационного носителя для активной системы дистанционного контроля состояния растительного покрова проведем для зондирования в надир (вертикально вниз) и длины волны 0,532 мкм (в видимом диапазоне растительный покров имеет наименьший коэффициент отражения).

Основные параметры лазерного источника и приемника, характеристики атмосферы, используемые в расчете: спектральная чувствительность ФЭУ – 75 мА/Вт; оптическая толща земной атмосферы – 0,41; показатель аэрозольного ослабления атмосферы у земной поверхности –  $8,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ ; показатель молекулярного ослабления атмосферы у земной поверхности –  $1,39 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ ; спектральная солнечная постоянная – 0,195 Вт/см<sup>2</sup>мкм; энергия в импульсе лазера – 1 мДж; длительность импульса – 10 нс; угол расходимости излучения после передающей оптической системы – 1 мрад; поле зрения приемной системы – 2 мрад; коэффициент пропускания передающей оптической системы – 0,8; коэффициент пропускания приемной системы – 0,28; радиус приемного объектива – 3 см; ширина фильтра – 1,5 нм; отношение сигнал/шум – 30.

Расчеты проводились для безоблачного неба при  $\theta_o = 45^\circ$ . Альбедо растительного покрова принималось равным 0,07.

На рисунке 14 показаны зависимости принимаемой мощности  $P(z)$  (1) лазерного сигнала и пороговой мощности  $P_{thr}$  (2) от высоты зондирования.



**Рис.14** - Зависимости принимаемой мощности лазерного сигнала и пороговой мощности от высоты зондирования

Предельная высота зондирования оценивалась из условия равенства мощности  $P(z)$  лазерного сигнала и пороговой мощности  $P_{thr}$ . Видно, что для длины волны 0,532 мкм предельная высота зондирования при выбранных для расчета (и реально достижимых в настоящее время) параметрах аппаратуры составляет немногим меньше 4 км. Для длины волны 0,8...0,9 мкм в ближнем инфракрасном диапазоне (при той же энергии лазерного импульса источника) предельная высота зондирования будет больше (в ближнем инфракрасном диапазоне больше коэффициент отражения растительности).

Таким образом, рассмотрен новый вариант лазерной системы контроля состояния растительного покрова, проводящей мониторинг растительности по данным измерений коэффициентов отражения. Показана возможность дистанционного контроля состояния растительного покрова при лазерном зондировании на двух длинах волн в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах при высоте полета авиационного носителя порядка единиц километров. Такая лазерная система зондирования может работать совместно с флуоресцентным лидаром для увеличения надежности обнаружения стрессовых состояний растительности.

### Список литературы

1. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 478 с.

2. Weitkamp C. Lidar. Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. Berlin: Springer, 2005. 460 p.
3. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации. Издание 2-е дополненное. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 572 с.
4. Gouveia-Neto A.S., Silva E.A., Oliveira R.A., Cunha P.C., Costa E.B., Câmara T.J.R., Willadino L.G. Water deficit and salt stress diagnosis through LED induced chlorophyll fluorescence analysis in *Jatropha curcas* L. oil plants for biodiesel // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 7902. Pp. 79020A-1-79020A-10. DOI: [10.1117/12.872991](https://doi.org/10.1117/12.872991)
5. Афонасенко А.В., Иглакова А.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Прокопьев В.Е. Лабораторные и лидарные измерения спектральных характеристик листьев березы в различные периоды вегетации // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 237-243.
6. Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Экспериментальное исследование лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений для стрессовых состояний, вызванных неправильным режимом полива // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 4. С. 267-281. DOI: [10.7463/0414.0707937](https://doi.org/10.7463/0414.0707937)
7. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2010. 148 с.
8. Chawla A., Kumar A., Subramani R., Singh J.S., Thukral A.K. Correlation of Multispectral Satellite Data with Plant Species Diversity vis-à-vis Soil Characteristics in a Landscape of Western Himalayan Region, India // Applied Remote Sensing. 2011. No. 1(1). Pp.1-13. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/228372807\\_Correlation\\_of\\_Multispectral\\_Satellite\\_Data\\_with\\_Plant\\_Species\\_Diversity\\_vis-a-vis\\_Soil\\_Characteristics\\_in\\_a\\_Landscape\\_of\\_Western\\_Himalayan\\_Region\\_India](https://www.researchgate.net/publication/228372807_Correlation_of_Multispectral_Satellite_Data_with_Plant_Species_Diversity_vis-a-vis_Soil_Characteristics_in_a_Landscape_of_Western_Himalayan_Region_India) (дата обращения 05.02.2016).
9. Hively W.D., G.W., Reeves III J.B., Lang M.W., Oesterling R.A., Delwiche S.R. Use of Airborne Hyperspectral Imagery to Map Soil Properties in Tilled Agricultural Fields // Applied and Environmental Soil Science. 2011. Vol. 2011. DOI: [10.1155/2011/358193](https://doi.org/10.1155/2011/358193)
10. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование // Группа «MapExpert»: веб-сайт. Режим доступа: [http://www.mapexpert.com.ua/index\\_ru.php?id=20&table=news](http://www.mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=20&table=news) (дата обращения: 05.02.2016).
11. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. Геоматика. 2009. №3. С. 28-32. Режим доступа: [http://sovzond.ru/upload/iblock/3b8/2009\\_03\\_005.pdf](http://sovzond.ru/upload/iblock/3b8/2009_03_005.pdf) (дата обращения 05.02.2016).

12. Шихов А.Н. Космический мониторинг засух на территории уральского прикамья по многолетним рядам данных дистанционного зондирования земли // Географический вестник. 2013. Т. 4(27). С. 100-107.
13. Географические информационные системы и дистанционное зондирование // GIS-Lab: веб-сайт. Режим доступа: <http://gis-lab.info/> (дата обращения 05.02.2016).
14. Zygielbaum A. I., Gitelson A.A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36, no. 12. DOI: [10.1029/2009GL038906](https://doi.org/10.1029/2009GL038906)
15. Carter G.A., Knapp A.K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration // Am. J. Bot. 2001. Vol. 88, no. 4. Pp. 677-684. Режим доступа: <http://www.amjbot.org/content/88/4/677.full.pdf+html> (дата обращения 05.02.2016).
16. USGS Digital Spectral Library 06. Режим доступа: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/> (дата обращения 05.02.2016).
17. Emengini E.J., Blackburn G.A., Theobald J.C. Detection and discrimination of stress in bean (*Phaseolus vulgaris* Tendergreen) caused by oil pollution and waterlogging using spectral and thermal remote sensing // Research Journal of Applied Sciences. 2013. Vol. 8. No. 6. Pp. 302-312. DOI: [10.3923/rjasci.2013.302.312](https://doi.org/10.3923/rjasci.2013.302.312)
18. Thorhaug A., Richardson A.D., Berlyn G.P. Spectral reflectance of *Thalassia testudinum* (Hydrocharitaceae) seagrass: low salinity effects // Am. J. Bot. 2006. Vol. 93, no. 1. Pp. 110-117. DOI: [10.3732/ajb.93.1.110](https://doi.org/10.3732/ajb.93.1.110)

## Laser Remote Sensing of Vegetation Cover Using Reflection Coefficients Measurement Data

M.L. Belov<sup>1,\*</sup>, Yu.S. Fesenko<sup>1</sup>, V.A. Gorodnichev<sup>1</sup>,  
A.V. Kuvshinov<sup>1</sup>

\*[belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** laser, remote sensing, vegetation cover, reflection coefficients

---

One of the promising applications of laser remote sensing is a remote control of the vegetation cover. Adverse external factors, lack of fertilizers, and pollution lead to the inability of the normal development of plants. To provide a visual control of such conditions of the vegetation cover at the early stages is often difficult. For this reason it is a relevant task to develop the remote sensing systems to detect plant stress conditions as the indicators of an insufficient nutrient level, pollutants available in the soil, etc.

An effective method of remote control of the vegetation conditions is that of laser-induced fluorescence. However, the laser fluorescent method of control has a drawback: for the majority of fluorescent lidars due to small value of the fluorescence cross sections an attainable range of the confident detection of fluorescence signal today is of 100–150 m.

Therefore, the relevant objective is to integrate the fluorescent lidar with other optical range equipment that enables remote sensing of vegetation condition from an aircraft at an altitude of several kilometers (with high altitude of flight the scanning equipment provides sensing a greater bandwidth on the earth's surface).

The paper analyses the laser remote system capabilities for sensing the vegetation conditions using the measurement data of vegetation reflection coefficients at various wavelengths.

It shows that the laser remote sensing system is capable to control vegetation at two radiation wavelengths - one in the visible spectral range (for example, 0.532  $\mu\text{m}$ ), and the other - in the near infrared spectral range (e.g. 0.8 ... 0.9  $\mu\text{m}$ ).

A potential delivery aircraft altitude for the active remote sensing system of vegetation conditions is estimated using the measurements of vegetation reflection coefficients. It is shown that for the wavelength of 0.532  $\mu\text{m}$  in the visible range the limit height of sensing (with realistically attainable now hardware parameters) is about 4 km. For the wavelength of 0.8 ... 0.9  $\mu\text{m}$  in the near infrared range (with the same laser pulse power source) the limit sensing height is higher (in the infrared range the reflection coefficient of vegetation is higher).

## References

1. Karasik V.E., Orlov V.M. *Lazernye sistemy videniya* [Laser vision system]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 478 p. (In Russian).
2. Weitkamp C. Lidar. *Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. Berlin: Springer, 2005. 460 p.
3. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoy lazernoy lokatsii* [Basics of pulsed laser detection]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 572 p. (In Russian).
4. Gouveia-Neto A.S., Silva E.A., Oliveira R.A., Cunha P.C., Costa E.B., Câmara T.J.R., Willadino L.G. Water deficit and salt stress diagnosis through LED induced chlorophyll fluorescence analysis in *Jatropha curcas* L. oil plants for biodiesel. *Proc. of SPIE*, 2011, vol. 7902, pp. 79020A-1-79020A-10. DOI: [10.1117/12.872991](https://doi.org/10.1117/12.872991)
5. Afonassenko A.V., Iglakova A.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Prokop'yev V.E. Laboratory and lidar measurements of birch leaves spectral characteristics in different periods of vegetation. *Optika atmosfery i okeana*, 2012, vol. 25, no. 3, pp. 237-243. (In Russian).
6. Fedotov Yu.V., Bullo O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Experimentally Studied Laser Fluorescence Method for Remote Sensing of Plant Stress Situation Induced by Improper Plants Watering. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 4, pp.267-281. (In Russian). DOI: [10.7463/0414.0707937](https://doi.org/10.7463/0414.0707937)
7. Tokareva O.S. *Obrabotka i interpretatsiya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Data processing and interpretation for Earth's remote sensing]. Tomsk, TPU Publ., 2010. 148 p. (In Russian).
8. Chawla A., Kumar A., Subramani R., Singh J.S., Thukral A.K. Correlation of Multispectral Satellite Data with Plant Species Diversity vis-à-vis Soil Characteristics in a Landscape of Western Himalayan Region, India . *Applied Remote Sensing*, 2011, no. 1(1), pp.1-13. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/228372807\\_Correlation\\_of\\_Multispectral\\_Satellite\\_Data\\_with\\_Plant\\_Species\\_Diversity\\_vis-a-vis\\_Soil\\_Characteristics\\_in\\_a\\_Landscape\\_of\\_Western\\_Himalayan\\_Region\\_India](https://www.researchgate.net/publication/228372807_Correlation_of_Multispectral_Satellite_Data_with_Plant_Species_Diversity_vis-a-vis_Soil_Characteristics_in_a_Landscape_of_Western_Himalayan_Region_India) (accessed 05.02.2016).
9. Hively W.D., G.W., Reeves III J.B., Lang M.W., Oesterling R.A., Delwiche S.R. Use of Airborne Hyperspectral Imagery to Map Soil Properties in Tilled Agricultural Fields. *Applied and Environmental Soil Science*. 2011, vol. 2011. DOI: [10.1155/2011/358193](https://doi.org/10.1155/2011/358193)
10. *Vegetatsionnye indeksy. Osnovy, formuly, prakticheskoe ispol'zovanie* [Vegetation indexes. Basics, formulas, application]. Gruppya «MapExpert»: web-site. Available at: [http://www.mapexpert.com.ua/index\\_ru.php?id=20&table=news](http://www.mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=20&table=news) (accessed 05.02.2016). (In Russian).



11. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral characteristics of vegetation and vegetation indexes. *Geomatika = Geomatics*, 2009, no. 3, pp. 28-32. Available at: [http://sovzond.ru/upload/iblock/3b8/2009\\_03\\_005.pdf](http://sovzond.ru/upload/iblock/3b8/2009_03_005.pdf) (accessed 05.02.2016). (In Russian).
12. Shikhov A.N. The space monitoring of drought on the territory of Ural Kama Region, based of long-term remote sensing data series. *Geograficheskiy vestnik = Geophysical Bulletin*, 2013, vol. 4(27), pp. 100-107. (In Russian).
13. *Geograficheskie informatsionnye sistemy i distantsionnoe zondirovanie* [Geographic information systems and remote sensing]. GIS-Lab: web-site. Available at: <http://gis-lab.info/> (Accessed: 05.02.2016). (In Russian).
14. Zygielbaum A. I., Gitelson A.A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize. *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, no. 12. DOI: [10.1029/2009GL038906](https://doi.org/10.1029/2009GL038906)
15. Carter G.A., Knapp A.K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *Am. J. Bot.*, 2001, vol. 88, no. 4, pp. 677-684. Available at: <http://www.amjbot.org/content/88/4/677.full.pdf+html> (Accessed: 05.02.2016).
16. *USGS Digital Spectral Library 06*. USGS: web-site. Available at: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/> (accessed 05.02.2016).
17. Emengini E.J., Blackburn G.A., Theobald J.C. Detection and discrimination of stress in bean (*Phaseolus vulgaris* Tendergreen) caused by oil pollution and waterlogging using spectral and thermal remote sensing. *Research Journal of Applied Sciences*, 2013, vol. 8, no. 6, pp. 302-312. DOI: [10.3923/rjasci.2013.302.312](https://doi.org/10.3923/rjasci.2013.302.312)
18. Thorhaug A., Richardson A.D., Berlyn G.P. Spectral reflectance of *Thalassia testudinum* (Hydrocharitaceae) seagrass: low salinity effects. *Am. J. Bot.*, 2006, vol. 93, no. 1, pp. 110-117. DOI: [10.3732/ajb.93.1.110](https://doi.org/10.3732/ajb.93.1.110)